

Sami Ruponen

Elintarviketehtaan sähkönjakeluverkon oikosulkuvirtojen laskenta

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Sähkövoimatekniikka

Insinöörityö

11.11.2016

Tekijä Otsikko Sivumäärä Aika	Sami Ruponen Elintarviketehtaan sähkönjakeluverkon oikosulkuvirtojen laskenta 30 sivua + 5 liitettä 11.11.2016
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Sähkötekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Sähkövoimatekniikka
Ohjaajat	Lehtori Tuomo Heikkinen Suunnittelupäällikkö Marko Taberman
<p>Insinööritötehtiin Hepacon Oy:lle. Insinööritötehtävänä oli sopivaa ohjelmistoa käyttäen laskea Fazer Vaaralan teollisuusalueen jakeluverkon oikosulkuvirrat. Yrityksellä ei ollut aiemmin käytössä laskentaohjelmistoa, jolla voidaan laskea sekä pien- että keskijänniteverkkojen oikosulkuvirtoja.</p> <p>Työssä tutustuttiin Fazer Vaaralan 20 kV:n jakeluverkkoon ja muuntoasemiin. Laskentaa varten oli kerättävä tiedot 20/0,4 kV:n muuntajista, käytetyistä kaapeleista ja selvitettävä yleisimmin käytetyt verkon kytkentätilanteet.</p> <p>Työssä käsiteltiin sähkönjakeluverkossa syntyviä eri vikatyyppejä ja niiden laskentaa, jotka käytiin lävitse teoriaosuudessa.</p> <p>Fazer Vaaralan sähkönjakeluverkon mallinnus ja laskenta toteutettiin Neplan-verkostolaskentaohjelmalla. Neplan on moduulipohjainen laskentaohjelma sähkö-, vesi-, kaasu- ja lämmitysverkoille. Ohjelmistosta oli käytössä 50 solmun industrial-paketti.</p> <p>Työn lopputuloksena saatiin päivitetyt oikosulkuvirtalaskelmat Fazerin Vaaralan teollisuusalueen jakeluverkosta.</p>	
Avainsanat	Oikosulkuvirta, verkostolaskenta, sähkönjakeluverkko

Author Title Number of Pages Date	Sami Ruponen A Food Factory's Electrical Distribution Network Short Circuit Calculation 30 pages + 5 appendices 11 November 2016
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Electrical Engineering
Specialisation option	Electrical Power Engineering
Instructors	Tuomo Heikkinen, Senior Lecturer Marko Taberman, Planning Manager
<p>This Bachelor's thesis was made for Hepacon Oy. The goal of this study was to model and calculate short circuit fault currents from Fazer Vaarala electrical distribution network by using a network calculation software. Before, Hepacon Oy did not have a suitable computer software for analyzing low-voltage and mid-voltage electricity distribution networks.</p> <p>The current situation of Fazer Vaarala's mid-voltage electricity network and power distribution station's were studied. This included gathering all information from used cables, transformers and other components. Fazer Vaarala's most used switching situations of mid-voltage distribution network and most common connections to the feeding grid were also examined.</p> <p>Theory and calculation of different short circuit fault types concerning electricity networks were also examined in this study.</p> <p>Fazer Vaarala electrical distribution network's modelling and short circuit fault current calculation were made by Neplan Electricity software tool. Neplan Electricity is a software tool to analyse, plan, optimize and simulate networks. Software is modular based and can be customized for users demands. Neplan has electric-, water-, gas- and heating software products. Neplan industrial package which had fifty nodes was used in this study.</p> <p>The result of this study is updated short circuit calculation data concerning Fazer Vaarala electrical distribution network.</p>	
Keywords	short circuit current, network calculation, electricity distribution network

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Teollisuuden sähköjakeluverkot	2
2.1	Teollisuusverkot	2
2.2	Verkkorakenteet	2
3	Oikosulkuvirta sähköverkossa	5
3.1	Oikosulkuvirran synty	5
3.2	Oikosulkuvirran luonne	6
3.3	Oikosulkujen yleisimmin laskettavat vikatyypit	8
4	Oikosulkuvirtojen laskenta	10
4.1	Laskennan peruskomponentit	10
4.2	Oikosulkuvirta I_k''	11
4.3	Sysäysoikosulkuvirta i_s	12
4.4	Terminen oikosulkuvirta I_{th}	14
4.5	Maasulkuvirta maasta erotetussa keskijänniteverkossa	15
5	Fazer Vaarala	17
5.1	Fazer	17
5.2	Fazer Vaaralan jakeluverkon rakenne	18
5.3	Muuntajat	20
5.3.1	Muuntajien perusteet	20
5.3.2	Fazer Vaaralan muuntajat	22
5.4	Kojeistot	22
5.5	Johdot, kaapelit ja kiskot	23
5.6	Epätahtimoottorit	24
6	Verkon mallinnus ja oikosulkuvirtalaskenta	25
6.1	Neplan	25
6.2	Laskenta	25
6.3	Tulokset	27
6.4	Tuloksien tarkastelu	27

7	Yhteenveto	28
	Lähteet	30
	Liitteet	
	Liite 1. Neplan, syöttävän verkon parametrit	
	Liite 2. Neplan, kaapelit	
	Liite 3. Neplan, muuntajat	
	Liite 4. Oikosulkuvirtojen laskenta	
	Liite 5. Neplan, näytettävät arvot	

Lyhenteet

C	Maakapasitanssi.
C-kerroin	Oikosulkuvirtojen suuruuden laskennassa tarvittava arvo.
I_f	Maasulkuvirta.
I_k''	Alkuoikosulkuvirta.
I_{k3}'''	Kolmivaiheinen alkuoikosulkuvirta.
I_{k2}''	Kaksivaiheinen alkuoikosulkuvirta.
I_{k1}''	Yksivaiheinen alkuoikosulkuvirta.
I_k'	Muutosoikosulkuvirta.
I_k	Jatkuvan tilan oikosulkuvirta.
I_{dyn}	Dynaaminen oikosulkuvirta.
I_{th}	Terminen oikosulkuvirta.
i_s	Sysäysoikosulkuvirta.
jx	Kaapelin reaktanssi.
k	Kerroin, jota käytetään määrittäessä sysäysoikosulkuvirtaa.
kA	Kiloampeeri.
KJ-verkko	Keskijänniteverkko.
kV	Kilovoltti.
L_k	Oikosulkuinduktanssi.

m	Tasavirtatekijä.
ms	millisekunti.
n	Vaihtovirtatekijä.
P_0	Muuntajan tyhjäkäyntiteho.
P_k	Muuntajan kuormitushäviöteho.
r	Kaapelin tasavirtaresistanssi.
r_k	Suhteellinen oikosulkuresistanssi.
R_k	Oikosulkuresistanssi.
S_n	Näennäisnimellisteho.
sf_6	Rikkiheksafluoridi, sähköeristeenä käytetty kaasu.
t	Aika, ajanhetki.
t_k	Oikosulun kesto aika.
U_n	Nimellisjännite (voltti).
x_k	Suhteellinen oikosulkureaktanssi.
X_k	Oikosulkureaktanssi.
Y_{nd11}	Jakelumuuntajan kytkentäryhmä.
z_k	Oikosulkuimpedanssi prosentteina.
Z_j	Kaapelin impedanssi.
Z_0	Nollaimpedanssi.

Z_1	Myötäimpedanssi.
Z_2	Vastaimpedanssi.
\hat{u}	Jännitteen huippuarvo.
VA	Näennäistehon yksikkö.
VES	Vantaan Energia Sähköverkot Oy.
ω	Kulmataajuus.
Z_k	Oikosulkuimpedanssi.
φ_k	Oikosulkuimpedanssin vaihekulma.
τ	Oikosulkupiirin aikavakio.

1 Johdanto

Teollisuuden sähköjakeluverkkojen turvallinen ja taloudellinen käyttö on yrityksen toiminnan kannalta erittäin tärkeää. Verkossa syntyvät sähkökatkot ja muut vikatilanteet saattavat aiheuttaa suuria taloudellisia menetyksiä yrityksille henkilövahingoista puhumattakaan.

Verkostolaskennalla voidaan vaikuttaa suuresti sähköverkon taloudelliseen ja turvalliseen käyttöön. Laskennan avulla saadaan selvitettyä oikosulkuvirrat ja kuormitukset verkon eri osissa. Oikosulkuvirtojen avulla suunnitellaan suojauksen toiminta ja komponenttien kestoisuudet eri vikatilanteissa.

Nykyiset laskentaohjelmat helpottavat verkon suunnittelua huomattavasti. Laskentaohjelmilla voidaan suunnitella, analysoida, optimoida ja simuloida verkon toimintaa eri tilanteissa.

Insinööri työn aihe on Fazer Vaaralan sähköjakeluverkon oikosulkuvirtalaskelmat ja niiden päivittäminen ajan tasalle. Laskentaa varten valitaan tähän tarkoitukseen sopiva ohjelma, jolla voidaan laskea pien- ja keskijänniteverkkojen oikosulkuvirtoja. Insinööri työ tehdään Hepacon Oy:lle.

Hepacon Oy on 1978 perustettu talotekniikan suunnittelu- ja konsultointiyritys.

2 Teollisuuden sähköjakeluverkot

2.1 Teollisuusverkot

Teollisuuden sähköjakeluverkoilla on tietynlaisia ominaispiirteitä. Teollisuuslaitos sijaitsee yleensä maantieteellisesti pienellä alueella ja käytetyt tehot ovat suuria. Sähköjakeluverkon etäisyydet ovat lyhyitä, joten oikosulkuvirrat pysyvät suurina koko verkon alueella. Tämä aiheuttaa kojeistoille ja laitteille omat vaatimuksensa.

Teollisuusverkon liityntä yleiseen verkkoon toteutetaan yleensä 110 kV:n, 20 kV:n, 10 kV:n tai 0,4 kV:n tasossa. Syöttöjännitettä lasketaan tarvittavaan tasoon muuntajilla, jolloin pystytään optimoimaan sopiva jännitetaso eri järjestelmille. Tehdasjakelussa voikin esiintyä edellä mainittujen jännitetasojen lisäksi myös 10 kV:n, 6 kV:n ja 3 kV:n tasoja. [1, s. 6–8.]

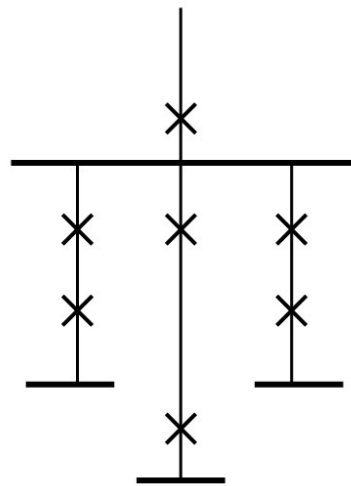
Isojen teollisuuslaitosten verkkoon kytketään yleensä useita suuritehoisia muuntajia ja moottoreita, joiden käynnistysvirrat ovat suuria, joten liityntä jakeluverkkoon tulee olla riittävän jäykkä. Teollisuuslaitoksella saattaa olla myös omaa energiatuotantoa esimerkiksi generaattoreita, jotka myöskin nostavat jakeluverkon oikosulkuvirtoja. [1, s. 6–8.]

Teollisuuden ympäristötekijät antavat myös omat haasteensa sähköjärjestelmien suunnittelulle ja ylläpidolle. Teollisuusympäristössä voi olla korkeita ja matalia lämpötiloja, kosteutta, likaa, pölyisyyttä, tärinää ja muuta mekaanista rasitusta. Komponenttien valinnassa tulee ottaa huomioon ympäristöolosuhteet. Kojesteille ja ohjausjärjestelmille suunnitellaan yleensä tilat, joihin ne sijoitetaan. Tällä vältetään keskeisten laitteistojen vikaantuminen ympäristöolosuhteiden vuoksi. [1, s. 6–8.]

2.2 Verkkorakenteet

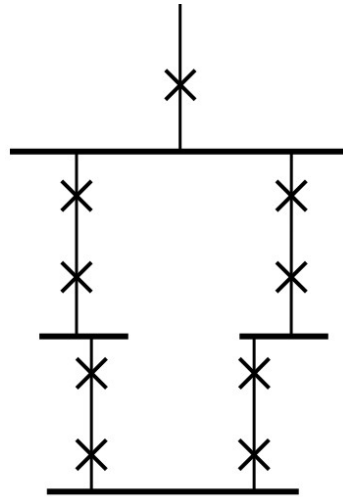
Verkkorakenteita on kolmea erilaista päätyyppiä; säteittäisverkko, rengasverkko ja silmukaverkko. Suunnitteluvaiheessa tulee miettiä tarkkaan teollisuuslaitokselle sopivin verkkorakenne. Rakenteen valintaan vaikuttaa käyttövarmuus ja kustannukset. Yleensä tuotannon pysähtyminen ei ole suotavaa eikä taloudellisesti kannattavaa. [2.]

Säteittäisverkko (kuva 1) on rakenteeltaan selkeä ja porrasmainen. Suojauksen toteuttaminen säteittäisverkossa on huomattavasti helpompaa kuin silmukoidussa verkossa, joka tarkoittaa käytännössä vian tarkempaa rajausta verkon alueella. Oikosulkuvirrat ovat tässä verkkotyypissä pienemmät ja jännitteensäätö helpompi toteuttaa. Säteiläisverkko on rakentamisvaiheessa edullisin toteuttaa verrattuna muihin verkkorakenteisiin. Verkon huonoja puolia ovat esimerkiksi huoltotilanteet. Varasyötön järjestäminen tuotannolle yksittäisen komponentin vikaantuessa saattaa olla haastavaa ja jopa mahdotonta monissa tapauksissa. Huoltokatkosten tekeminen ilman tuotannon pysäyttämistä on miltei mahdotonta. [2; 3, s. 11–13.]



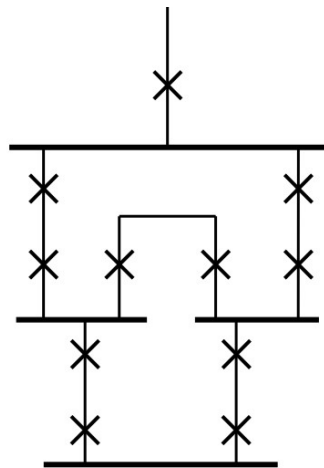
Kuva 1. Säteiläisverkko [2.]

Rengasverkko (kuva 2) on toimintavarmempi, jännitevakaampi ja tehohäviöiltään pienempi verrattuna säteiläisverkkoon. Huonoja puolia verkkotyypissä ovat suuremmat rakennuskustannukset, suojauksen monimutkaisuus ja riskialttiimpi käyttö. Verkon huoltaminen onnistuu paremmin ja helpommin kuin säteiläisverkossa. [2.]



Kuva 2. Rengasverkko [2.]

Silmukkaverkko (kuva 3) on samankaltainen tyypiltään kuin rengasverkko, mutta vielä hieman monimutkaisempi. Jännitevakavuus, toimintavarmuus ja tehohäviöt on tämänkin verkkotyypin hyviä puolia. Huonoja puolia silmukkaverkossa ovat kallis hinta, suojauksen monimutkaisuus ja käytön vaativuus. Huoltokatkot voidaan järjestää myös helpommin kuin säteittäisverkossa. [2].



Kuva 3. Silmukkaverkko [2.]

Suomessa sähkönsiirtoverkko on silmukoitu verkko. Tämä tarkoittaa sitä, että varayhteys toisesta suunnasta on aina olemassa. Järjestelmä on suunniteltu siten, että se kestää yhden komponentin vikaantumisen ja irtoamisen. Jos verkko romahtaa, niin vika ulottuu laajalle alueelle. Jakeluverkot rakennetaan yleensä silmukkaverkoiksi, mutta

niitä käytetään säteittäisenä. Tällöin yhden komponentin vikaantuminen aiheuttaa katkoksen jollekin alueelle tai kuormalle. Yhteys saadaan yleensä palautettua nopeasti tekemällä kytkentämuutoksia verkkoon. Varsinkin maakaapeliverkoissa vian korjaaminen on hidasta, joten pyrkimyksenä on tuoda jokaiselle jakelumuuntamolle kaksi keski-jännitesyöttöä. [3, s. 11–13.]

3 Oikosulkuvirta sähköverkossa

3.1 Oikosulkuvirran synty

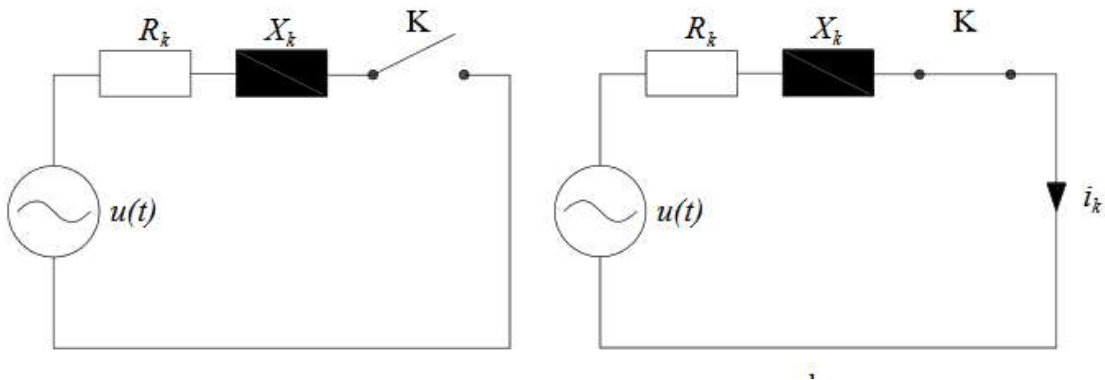
Oikosulkuvirrat pyrkivät kasvamaan suuriksi erityisesti teollisuuden sähköjakeluverkoissa. Verkkoon on useasti liitetty suuritehoisia muuntajia, omaa sähköntuotantoa ja suuria moottoreita. Näiden edellä mainittujen laitteiden vuoksi oikosulkuvirrat pyrkivät kasvamaan suuriksi. Suuren oikosulkuvirran etuja ovat esimerkiksi verkon pieni impedanssi, hyvä jännitejäykkyys ja nopea suojauksen havahtuminen. Toisaalta turvallisen käytön ja mahdollisten vahinkojen minimoimiseksi, oikosulkuvirtojen tulisi olla mahdollisimman pieniä. Pienen oikosulkuvirran etuja ovat esimerkiksi pienet voimavaikutukset ja valokaaret.

Oikosulkuvirrat on tunnettava eri vikatilanteissa ja verkon eri osissa, kun mitoitetaan laitteita, suunnitellaan oikosulkusuojausta ja verkon turvallista käyttöä. Verkon komponenttien tulee kestää oikosulun aikaiset dynaamiset ja termiset rasitukset. Suojalaitteet vaativat riittävän suuren oikosulkuvirran toimiakseen, joten oikosulkuvirran pienuudella on myös rajansa. Vikavirtojen suuruuteen voidaan vaikuttaa verkostosuunnittelulla.

Oikosulku syntyy jakeluverkon virtapiirin sulkeuduttua eristysvian tai ulkoisen kosketuksen takia. Virtapiiri voi sulkeutua suoraan, valokaaren tai jonkun muun vikaimpedanssin kautta. Oikosulku voi syntyä kolmen tai kahden vaiheen välille. Vika voi syntyä myös vaiheen ja maan välille. Oikosulkuja saattaa aiheuttaa laitteiden vikaantuminen, inhimillinen erehdys, laitteiden ylikuormittaminen, toimintahäiriöt, laitteiden ikääntyminen ja eristeiden haurastuminen ja ilkivalta. Viat voivat aiheuttaa tulipaloja, sähkökatkoksia ja pahimmassa tapauksessa henkilövahinkoja. Oikosululle on tyypillistä kuormitusvirtaa suurempi virta. [3, s. 28; 4, s.1.]

3.2 Oikosulkuvirran luonne

Suurjännitteellä oikosulkupiirin impedanssi on pääasiassa induktiivista, joten virtakin on induktiivista loisvirtaa. Alle 1000 voltin verkoissa pätökomponentin osuus kasvaa huomattavasti. Oikosulkuvirran syntymistä voidaan tarkastella yksivaiheisen sijaiskytkennän avulla. Kuvassa 4 on esitetty sijaiskytkentä, jossa oikosulkua vastaa kytkimen K sulkeutuminen. [4, s. 2.]



Kuva 4. Yksivaiheinen sijaiskytkentä. [4, s. 2.]

Syöttöjännite on sinimuotoinen ja noudattaa lauseketta $u(t) = \hat{u} \sin(\omega t + \alpha)$. Piirin komponentit esittävät verkon resistanssia ja reaktanssia. Kuvan 4 piirille voidaan kirjoittaa differentiaaliyhtälö. [4, s. 2.]

$$R_k i_k + L_k \frac{di_k}{dt} = \hat{u} \sin(\omega t + \alpha) \quad (1)$$

Yhtälöstä 1 saadaan oikosulkuvirraksi ratkaistua yhtälön 2 mukaisesti:

$$i_k(t) = \frac{\hat{u}}{Z_k} \left[\sin(\omega t + \alpha - \varphi_k) - e^{-\frac{\tau}{T}} \sin(\alpha - \varphi_k) \right] \quad (2)$$

R_k on piirin oikosulkuresistanssi
 L_k on piirin oikosulkuinduktanssi
 \hat{u} on jännitteen huippuarvo
 t on aika oikosulun alkuhetkestä
 ω on kulmataajuus
 Z_k on oikosulkuimpedanssi
 φ_k on oikosulkuimpedanssin vaihekulma
 τ on oikosulkupiirin aikavakio.

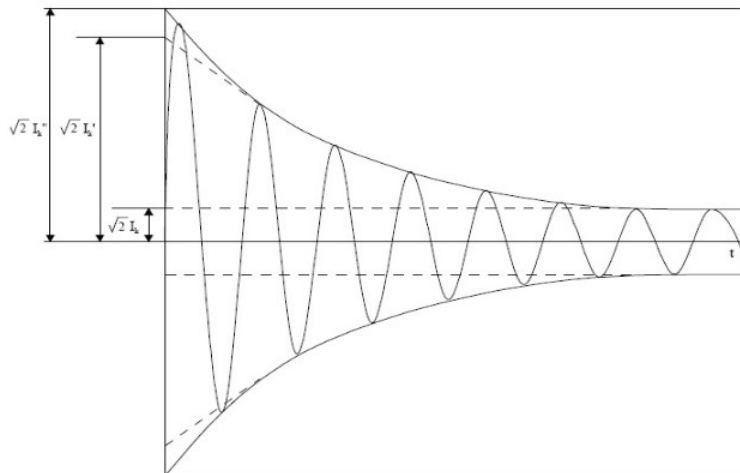
Oikosulkuvirtaa kuvaavassa yhtälössä 2 oleva piirin oikosulkuimpedanssi, impedanssin vaihekulma ja piirin aikavakio voidaan määrittellä oikosulkuresistanssin ja oikosulku-reaktanssin avulla.

$$Z_k = \sqrt{R_k^2 + X_k^2} \quad (3)$$

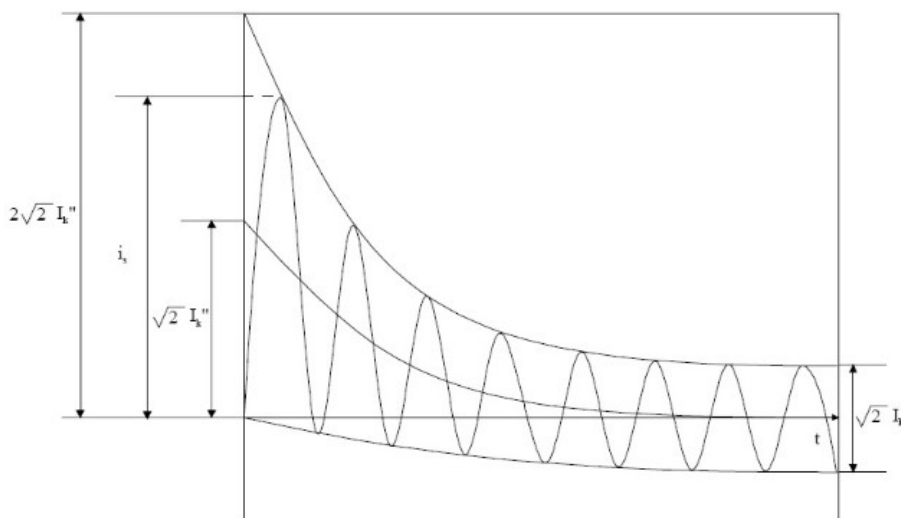
$$\varphi_k = \arctan \frac{X_k}{R_k} \quad (4)$$

$$\tau = \frac{X_k}{\omega R_k} = \frac{L_k}{R_k} \quad (5)$$

Yhtälö 2 sisältää kaksi tekijää, jotka ovat vaihtovirta- ja tasavirtakomponentti. Ensimmäinen termi on oikosulkuvirran vaihtovirtakomponentti ja jälkimmäinen termi on oikosulkuvirran tasakomponentti. Tasakomponentin ominaisuus on, että se vaimenee eksponentiaalisesti heti alkuhetkestä alkaen päätyen lopulta nolleen. Tasakomponentin suuruus riippuu jännitteen hetkellisarvosta oikosulun syntymishetkellä. Mikäli tasavirtakomponentti on nolla, puhutaan symmetrisestä oikosulusta (kuva 5). Kolmivaihejärjestelmässä kahdessa vaiheessa on aina tasakomponentti. [5, s. 171.]



Kuva 5. Symmetrinen vaimeneva oikosulkuvirta. I_k'' on alkuoikosulkuvirta, I_k' on muutosoikosulkuvirta ja I_k on jatkuvan tilan oikosulkuvirta eli pysyvä arvo. [5, s. 171.]



Kuva 6. Epäsymmetrinen vaimeneva oikosulkuvirta. I_k'' on alkuoikosulkuvirta, I_k on jatkuvan tilan oikosulkuvirta ja i_s on sysäysoikosulkuvirta. [5, s.171.]

Kuvasta 6 nähdään sysäysoikosulkuvirran i_s huippuarvo, joka on noin 2,5-kertainen alkuoikosulkuvirtaan I_k'' nähden. Dynaaminen rasitus syntyy sysäysoikosulkuvirrasta, joka saa suurimman arvonsa noin 10 millisekunnin kuluttua oikosulun syntyhetkestä. Dynaamisella rasituksella tarkoitetaan oikosulun aiheuttamia mekaanisia vaikutuksia verkon komponentteihin. Sysäysoikosulkuvirrasta käytetään myös lyhennettä i_p .

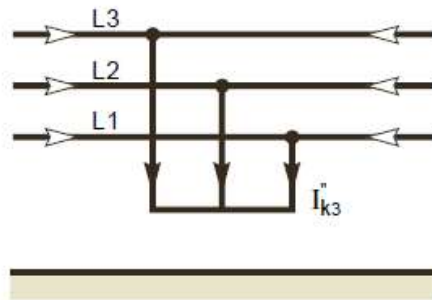
3.3 Oikosulkujen yleisimmin laskettavat vikatyypit

Kolmivaiheinen vastukseton oikosulku (kuva 7) aiheuttaa suurimman vikavirran verkkoon. Oikosulkuvirran suuruus on yleensä 10–40-kertainen nimellisvirtaan verrattuna. Kolmivaiheisessa viassa jokainen vaihe syöttää vikapaikkaan oikosulkuvirtaa. [5, s. 170.]

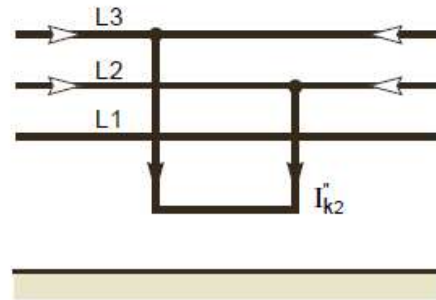
Kaksivaiheinen oikosulku on havainnollistettu kuvassa 8. Yleensä kaksivaiheisen vian oikosulkuvirta on pienempi kuin kolmivaiheisen vian. Kaksivaiheinen oikosulku maasululla on kuvassa 9 ja kuvassa 10 on yksivaiheinen maasulku.

Maasulku on määritelty sähköturvallisuusmääräyksissä käyttömaadoittamattoman virtajohtimen ja maan tai maahan johtavassa yhteydessä olevan osan väliseksi eristysviaksi. Käyttömaadoitetun verkon yksivaiheinen maasulku on yksivaiheisen oikosulun kaltainen ja voidaan se laskea, kun tunnetaan verkon impedanssit. Verkon ollessa maas-

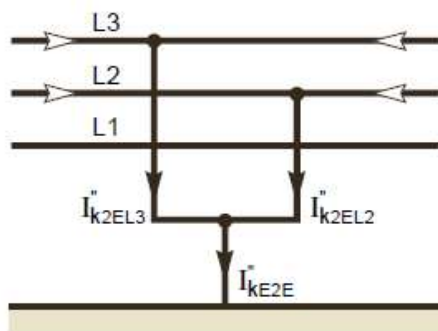
ta erotettu ja kompensoitu, tulee tietää verkon kaikki galvaanisesti yhdessä olevat osat, jotta verkosta voidaan laskea maasulkuvirrat ja nollajännitteet. [2.]



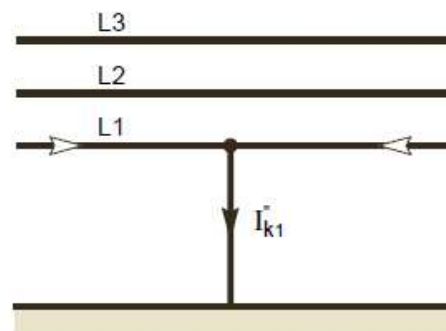
Kuva 7. Kolmivaiheinen oikosulku. [2.]



Kuva 8. Kaksivaiheinen oikosulku. [2.]



Kuva 9. Kaksivaiheinen maasulku. [2.]



Kuva 10. Yksivaiheinen maasulku. [2.]

4 Oikosulkuvirtojen laskenta

4.1 Laskennan peruskomponentit

Säteittäisen verkon oikosulkuvirtojen tarkkoja arvoja laskettaessa käytetään yleensä Theveninin menetelmää. Theveninin menetelmässä verkosta tehdään yksinkertaistettu sijaiskytkentä, jossa verkon komponentit kuvataan sarjaan kytketyillä impedansseilla ja jännitelähteellä. Ominaisoikosulkutehomenetelmä on yksinkertaisin ja helpoin tapa selvittää verkossa olevat oikosulkuvirrat, jos likimääräinen tulos on riittävä. Tässä työssä ei käsitellä tätä laskentatapaa enempää.

Syöttävä verkko ja generaattorit ovat oikosulkuvirtaa syöttäviä komponentteja, joista muodostetaan theveninin jännitelähde. Sysäysoikosulkuvirtaa määritettäessä on otettava myös huomioon tahti- ja epätahtimoottoreiden syöttämä oikosulkuvirta.

Muuntajat, kaapelit, kuristimet, kiskostot ja johdot ovat oikosulkuvirtaa rajoittavia komponentteja, jotka muodostavat piirin impedanssin. Kolmivaiheinen oikosulkuvirta eli symmetrinen oikosulku sisältää vain myötäimpedansseja eli tavallisia oikosulkuimpedansseja. Epäsymmetrisiä oikosulkutapauksia laskettaessa joudutaan piiriin sijoittamaan myös vasta- ja nollaimpedansseja. Vasta- ja myötäimpedanssit ovat yhtä suuret muuntajilla, johdoilla, muuntajilla ja kuristimilla. Tahtikoneilla myötä- ja vastaimpedanssit poikkeavat toisistaan. [4, s. 9; 5, s. 184; 6, s. 2.]

Tässä työssä ei käsitellä epäsymmetristen vikatapausten impedanssien laskentaa, vaan annetaan eri vikatapausten valmiit yhtälöt. Myötä-, vasta- ja nollaimpedanssien teoriaa ja laskentaa on käsitelty lähteessä 5.

Jännitetasona käytetään suunniteltavissa verkoissa nimellisjännitettä U_n kerrottuna vikapaikan jännitteen c-kertoimella, joka määritetään IEC 60909-standardin taulukosta 1. Kerroin c valitaan sen mukaan lasketaanko suurinta vai pienintä oikosulkuvirtaa.

Taulukko 1. IEC 60909-standardin mukainen jännitekerroin c.

Nimellisjännite U_n	Maksimioiko- sulkuvirta c_{max}	Minimioiko- sulkuvirta c_{min}
pienjännite 100 V – 1000 V a) 230 V / 400 V b) muut jännitteet	1.00 1.05	0.95 1.00
keskijännite 1 kV - 35 kV	1.10	1.00
suurjännite 35 kV - 230 kV	1.10	1.00

4.2 Oikosulkuvirta I_k''

Sähköverkon komponenttien mitoituksen ja verkon suunnittelun ensimmäisiä laskettava perusarvoja on alkuoikosulkuvirta I_k'' . Alkuoikosulkuvirran arvoa tarvitaan, kun määritetään muita verkon suunnittelussa tarvittavia arvoja. Theveninin menetelmän yksivaiheisen sijaiskytkennän oikosulkuvirta I_k'' saadaan yhtälöstä:

$$I_k'' = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \sqrt{R_k^2 + X_k^2}} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} Z_k} \quad (6)$$

c on IEC 60909- mukainen jännitekerroin
 U_n on vikapaikan nimellisjännite
 Z_k on oikosulkupiirin impedanssi.

Kolmivaiheinen eli symmetrinen oikosulkuvirta I_{k3}'' saadaan laskettua yhtälöstä:

$$I_{k3}'' = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} Z_1} \quad (7)$$

c on IEC 60909- mukainen jännitekerroin
 U_n on vikapaikan nimellisjännite
 Z_1 on oikosulkupiirin myötäimpedanssi.

Kaksivaiheinen oikosulkuvirta I_{k2}'' ilman maakosketusta saadaan laskettua yhtälöstä:

$$I_{k2}'' = \frac{c * U_n}{Z_1 + Z_2} \quad (8)$$

c on IEC 60909- mukainen jännitekerroin
 U_n on vikapaikan nimellisjännite
 Z_1 on oikosulkupiirin myötäimpedanssi
 Z_2 on oikosulkupiirin vastaimpedanssi.

Yksivaiheinen oikosulkuvirta saadaan laskettua yhtälöstä:

$$I_{k1}'' = \frac{\sqrt{3} * c * U_n}{Z_1 + Z_2 + Z_0} \quad (9)$$

c on IEC 60909- mukainen jännitekerroin
 U_n on vikapaikan nimellisjännite
 Z_1 on oikosulkupiirin myötäimpedanssi
 Z_2 on oikosulkupiirin vastaimpedanssi
 Z_0 on oikosulkupiirin nollaimpedanssi.

Oikosulkuvirran suuruus riippuu suhteista Z_1/Z_0 ja Z_2/Z_1 . Yleensä kolmivaiheinen oikosulkuvirta on suurin. Joissakin tapauksissa yksivaiheinen oikosulkuvirta lähellä muuntajan maadoitettua tähtipistettä saattaa olla suurempi kuin kolmivaiheinen oikosulkuvirta. Laskettaessa muutosoikosulkuvirtaa I_k' ja pysyvän tilan oikosulkuvirtaa I_k on huomiotava suurten moottoreiden reaktanssien muutokset. [6, s.3.]

4.3 Sysäysoikosulkuvirta i_s

Sysäysoikosulkuvirta i_s määrittää, kuinka suuren dynaamisen kuormituksen oikosulkutilanne aiheuttaa enimmillään verkon komponenteille. Sysäysoikosulkuvirta saa suurimman arvonsa noin 10 ms kuluttua oikosulun syntyhetkestä.[4, s.23.] Kuvan 6 perusteella voidaan arvioida sysäysoikosulkuvirran i_s suuruudeksi:

$$i_s < 2\sqrt{2}I_k'' \quad (10)$$

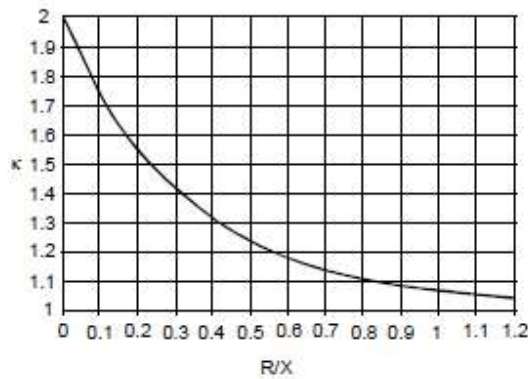
Kansainvälisen standardin IEC 60909 mukaan sysäysoikosulkuvirta lasketaan yhtälöstä:

$$i_s = k * \sqrt{2}I_k'' \quad (11)$$

jossa

$$k \approx 1,02 + 0,98 * e^{-3\frac{R}{X}} \quad (12)$$

Kerroin k voidaan määrittää kuvasta 11,



Kuva 11. Kertoimen k määrittäminen R/X suhteesta.[4, s.23.]

Suurjännitteellä voidaan käyttää k -arvona 1,8, jos tarkkaa arvoa ei pystytä määrittämään. Aikaisemmin käytettiinkin yleisesti VDE-standardista peräisin olevaa yhtälöä:

$$i_s = 1,8\sqrt{2}I_k'' \approx 2,5 * I_k'' \quad (13)$$

Pienjänniteverkossa k -arvo on yleensä alle 1,44, jolloin tarvittaessa voidaan käyttää sysäysaikavirran i_s määrittämiseen yhtälöä:

$$i_s = 1,44\sqrt{2}I_k'' \approx 2 * I_k'' \quad (14)$$

Pienjänniteverkon k -arvon määrittämiseen voidaan myös käyttää taulukkoa 2, jos tarkkoja R/X arvoja ei ole tiedossa [4, s. 23.]:

Taulukko 2. Pienjänniteverkon sysäysaikavirta sysäyskertoimen määrittäminen. [4, s.23.]

I_k''/kA	κ	$\cos\varphi$
≤ 10	1,2	0,5
≤ 20	1,4	0,3
≤ 50	1,5	0,25
> 50	1,6	0,2

4.4 Terminen oikosulkuvirta I_{th}

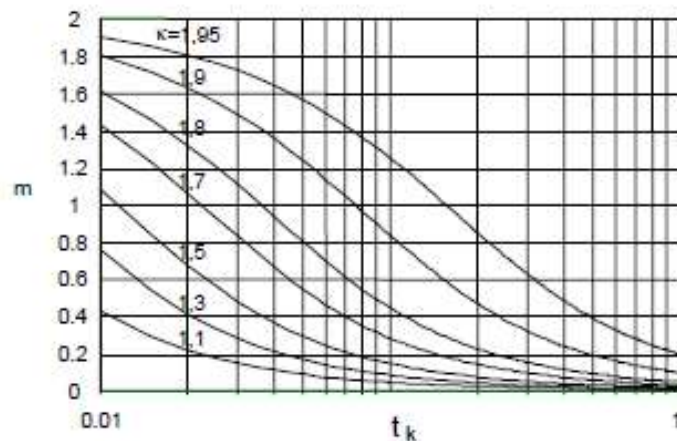
Terminen oikosulkuvirta I_{th} lasketaan yhtälöllä (15). Se lasketaan alkuoikosulkuvirran I_k'' arvosta tasa- ja vaihtovirtatekijöiden sekä vian keston avulla. Terminen oikosulkuvirta I_{th} kuvastaa lämpömäärää, jonka todellinen oikosulkuvirta aiheuttaa tietyssä ajassa. Yleensä mitoituksessa käytetään 1 sekunnin termistä oikosulkuarvoa I_{1s} . [4, s.29.]

Termisen oikosulkuvirran I_{th} yhtälö on:

$$I_{th} = I_k'' \sqrt{(m + n)t_k} \quad (15)$$

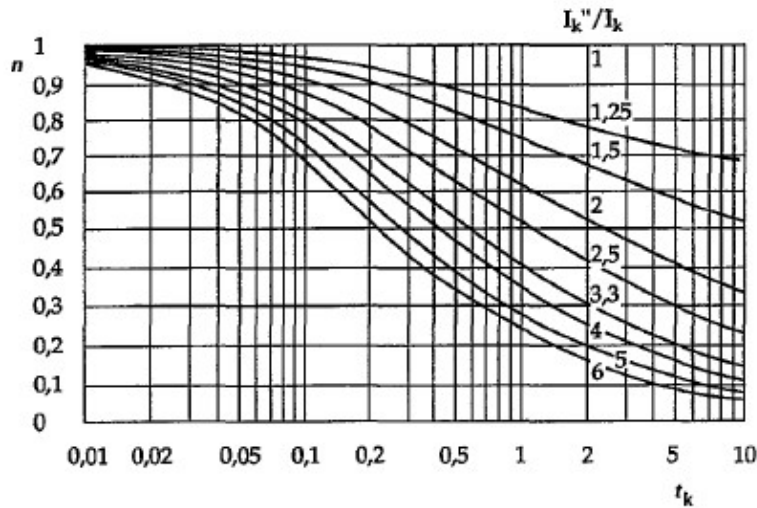
m on tasavirtatekijä
 n on vaihtovirtatekijä
 t_k on oikosulun kesto aika.

Tasavirtatekijä m määritetään kuvasta 12 sysäysoikosulkuvirran sysäyskertoimen k ja oikosulun keston t_k avulla. Tasavirtatekijällä m otetaan huomioon tasakomponentin vaimeneminen. [6, s. 8.]



Kuva 12. Tasavirtatekijän m riippuvuus sysäysoikosulkuvirran sysäyskertoimesta ja vian kestoajasta t_k . [6, s. 8.]

Vaihtovirtatekijä n määritellään kuvasta 13 alkuoikosulkuvirran I_k'' ja pysyvän oikosulkuvirran I_k suhteesta sekä oikosulun kestoajasta t_k . Vaihtovirtatekijällä otetaan huomioon vaihtovirtakomponentin vaimeneminen. [6, s. 8.]

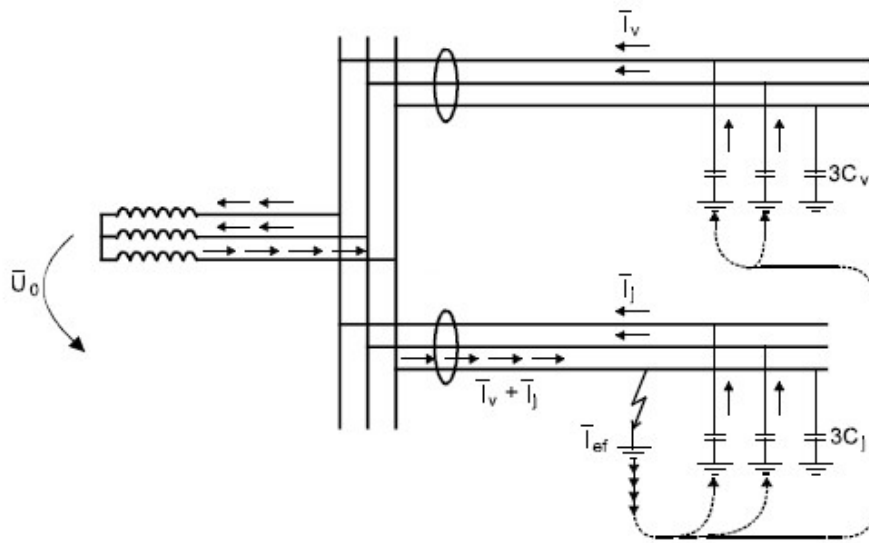


Kuva 13. Vaihtovirtatekijän n riippuvuus oikosulkuvirtojen I_k''/I_k suhteesta ja oikosulun kestoajasta t_k . [6, s. 9.]

4.5 Maasulkuvirta maasta erotetussa keskijänniteverkossa

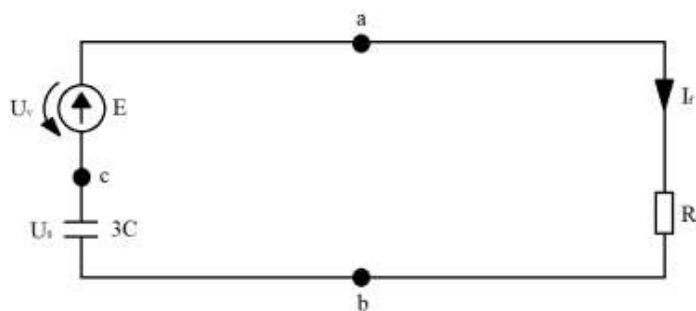
Keskijänniteverkot ovat yleensä maasta erotettuja tai ns. sammutettuja verkkoja. Sammutetussa verkossa verkon tähtipisteeseen kytketään induktiivinen reaktanssi, jonka suuruus vastaa verkon galvaanisessa yhteydessä olevien kaapeleiden kapasitiivisia reaktansseja.

Maasta erotetussa verkossa ei ole pieni-impedanssista reittiä, jonka avulla syntyisi oikosulku yksivaiheisessa maasulussa. Maasulkuvirralla on maasta erotetussa verkossa kulkureitti vikapaikasta maahan johtojen maakapasitanssien, vaihejohtimien impedanssien, muuntajan käämitysten ja viallisen vaiheen impedanssin kautta. [3, s. 182–189.]



Kuva 14. Maasulkuvirran muodostuminen maasta erotetussa verkossa. (ABB:n TTT-käsikirja 2000-7, luku 8, sivu 5)

Piirin johtimien ja muuntajakäämien impedanssit ovat hyvin pieniä, vain muutamia ohmeja. Vaihejohtimien kapasitanssit taas ovat hyvin suuria, satoja jopa tuhansia ohmeja. Tästä seuraa se, että johtimien ja muuntajakäämien impedanssien vaikutus lopputulokseen on niin pieni, että ne voidaan olettaa nolllaksi maasulkulaskelmissa. Theveninin sijaiskytkentä muodostuu edellä mainittujen seikkojen perusteella jännitelähteestä, johtimien kapasitansseista ja mahdollisesta vikaimpedanssista. Sijaiskytkentä on esitetty kuvassa 15. [3, s. 182–189.]



Kuva 15. Theveninin sijaiskytkentä maasulkupiirissä. [3, s. 184.]

Maasulkuvirran I_f yhtälöksi sijaistykennän avulla saadaan:

$$I_f = \frac{E}{R_f + \frac{1}{j3\omega C}} \quad (16)$$

jossa,
 E on vaihejännite
 R_f on vikaresistanssi
 C on yhden vaiheen maakapasitanssi.

Tässä työssä ei käsitellä maasta erotetun verkon maasulkuvirtojen laskentaa tämän enempää.

5 Fazer Vaarala

5.1 Fazer

Oy Karl Fazer Ab on perustettu vuonna 1891 Helsingissä, jolloin Karl Fazer avasi konditorian Kluuvikadulle. Vuonna 1894 alkoi suklaan ja konvehtien valmistaminen. Varhaisimpia tuotteita, jotka tunnetaan vielä nykyäänkin ovat: Pihlaja-marmeladi vuodelta 1895, Mignon-muna vuodelta 1896 ja Kiss-Kiss karamelli vuodelta 1897. [7.]

Vuoden 2015 lopussa Fazerilla työskenteli 14709 henkeä, joista Suomessa 6146 henkeä. Toimintaa yrityksellä on kaikkiaan 8:ssa eri maassa. Fazer-konsernin liikevaihto vuonna 2015 oli 1576 miljoonaa euroa, josta Suomen osuus on 859 miljoonaa euroa. [7.]

Fazer Vaarala sijaitsee Vantaalla, jossa toimii leipomo, keksi- ja makeistehdas. Ensimmäinen rakennus alueelle on valmistunut vuonna 1956, jolloin myös toiminta alkoi. Varsinaisia rakennuksia alueella on kaksi, joita on laajennettu tuotannon kasvun mukaan. Alueelta löytyy myös päiväkotia, joka on tarkoitettu työntekijöiden lapsille. Tänä päivänä alueen rakennusten yhteenlaskettu lattiapinta-ala on noin 20 hehtaaria ja työntekijöitä on noin 2200. Sähkön kulutuksen mitattu huipputeho on noin 11 MW. [8]

5.2 Fazer Vaaralan jakeluverkon rakenne

Fazer Vaarala on liittynyt Vantaan Energian sähkönjakeluverkkoon 20 kV -liittymällä. Fazerin jakeluverkkoa voidaan syöttää joko Vantaan Energian Vaaralan tai Honkanummen sähköasemilta. Sähköasemat omistaa Vantaan Energia Sähköverkot Oy (VES). VES omistaa kytkinasemia KA 1211 ja KA 1212 syöttävät kaapelit. Omistusraja on näiden syöttökaapeleiden päätteissä, jotka kuuluvat vielä VES:ille.

Fazer omistaa kytkinasemat KA1211 ja KA 1212, jotka jakavat sähköä verkon eri osiin. Näiden kytkinasemien kautta syötetään Fazerin jakeluverkkoa pois lukien tilanne, jolloin varayhteys Honkanummen sähköasemalta on käytössä. Fazerin jakeluverkko on silmukkatyyppinen, mutta sitä käytetään säteittäisenä. Jakeluverkossa on useita erilaisia kytkentämahdollisuuksia, joilla verkkoa voidaan syöttää. Yleisimmässä käyttötilanteessa makeistehdas ja leipomo ovat eri lähtöjen takana Fazerin jakeluverkossa sekä VES:n sähköasemalla.

Lähes kaikilla muuntoasemilla on kaksi syöttöä, jolloin syötön tulosuuntaa voidaan muuttaa tarvittaessa. Tällä menettelyllä verkko on huomattavasti varmempi mahdollisen vikatilanteen sattuessa. Fazerin 20 kV:n jakeluverkkoon kuuluu yhteensä 3 kytkinasemaa ja 13 muuntoasemaa.

Fazerin jakeluverkkoa voidaan syöttää monilla eri VES:n käyttötilanteella, jotka vaikuttavat syötettävän oikosulkuvirran suuruuteen. Mainitsen tässä työssä kolme eri perustilannetta: maksimitilanteen, normaalitilanteen ja minimitalanteen.

Maksimitilanne

Maksimitilanteessa Fazerin jakeluverkkoa syöttää kaksi Vaaralan sähköaseman päämuuntajaa rinnan kytkettynä suuruudeltaan 31,5 MVA. Vaaralan aseman lähtö D3 syöttää kytkinasemaa 1211 ja lähtö D13 syöttää kytkinasemaa 1212. Tässä kytkentätilanteessa kolmivaiheinen oikosulkuvirta Fazerin jakeluverkon ensimmäisessä laskentapisteessä on noin 14,9 kA.

Normaalitilanne

Normaalitilanteessa Fazerin jakeluverkkoa syöttää yksi Vaaralan sähköaseman 31,5 MVA:n päämuuntaja. Vaaralan aseman lähtö D3 syöttää tässäkin tilanteessa kytkinasemaa 1211 ja lähtö D13 syöttää kytkinasemaa 1212. Tässä kytkentätilanteessa kolmivaiheinen oikosulkuvirta Fazerin jakeluverkon ensimmäisessä laskentasolmupisteessä on noin 8,3 kA.

Minimitilanne

Minimitilanteessa Fazerin jakeluverkkoa syöttää Honkanummen sähköaseman 40 MVA:n päämuuntaja. Honkanummen lähtö HNU J31 syöttää muuntamoita FLMA 3. Fazerin jakeluverkon kytkentä poikkeaa minimitalanteessa normaalitilanteeseen verrattuna. Tässä kytkentätilanteessa kolmivaiheinen oikosulkuvirta Fazerin jakeluverkon ensimmäisessä laskentasolmupisteessä on noin 4,9 kA.

Eri kytkentätilanteisiin vaikuttaa syöttävien päämuuntajien määrä, päämuuntajien käämikytkimien asento, Fazerin varavoimageneraattorin käyttötilanne ja Fazerin oman verkon kytkentätilanne.

Fazerin oma jakeluverkko on silmukkatyyppinen, mutta sitä käytetään säteittäisenä. Normaalisessa käyttötilanteessa kytkinasemalta 1212 syötetään leipomon muuntoasemia FLMA1, FLMA3, FLMA4 ja FLMA 5.

Kytkinasemalta 1211 on kaksi lähtöä, jotka syöttävät makeistehtaan puolta. Toinen lähdöistä syöttää kytkinasemaa KA1, josta haarautuu syötöt muuntoasemille MA6, MA8, MA9, MA2 ja MA3. Toinen kytkinaseman 1211 lähdöistä syöttää muuntoasemia MA1, MA10 ja MA4.

Fazerin jakeluverkkoon on tehtävä kytkentämuutoksia syötön tullessa Honkanummen sähköasemalta. Muuntoasemalta FLMA3 on kaapelointiyhteys kytkinasema KA1:lle, joka tässä syöttötilanteessa otetaan käyttöön.

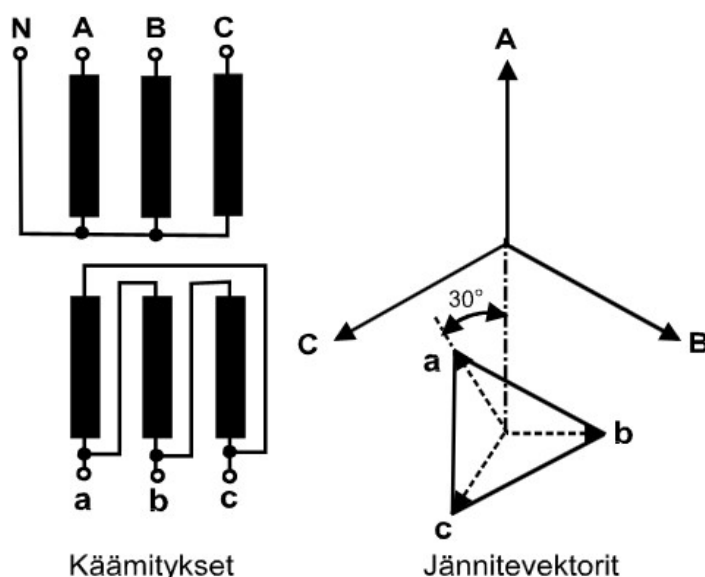
Varavoimapääkeskuksella on oma muuntaja, joka saa syöttönsä kytkinaseman 1211 varavoimalähdöstä. Varavoimapääkeskukseen on kytketty myös varavoimageneraattori, jonka koko on 800 kVA.

5.3 Muuntajat

5.3.1 Muuntajien perusteet

Muuntaja on sähkölaite, jolla muunnetaan vaihtosähköjärjestelmässä jännitteitä ja virtoja käämitysten avulla halutun suuruiseksi. Jännitettä voidaan muuntajan avulla laskea halutun suuruiseksi esimerkiksi 20 kV:sta 0,4 kV:in niin kuin Fazerin jakeluverkossa on tehty. Jännitettä voidaan myös nostaa muuntajan avulla. Tällöin käytetään nimitystä jännitettä nostava muuntaja. [9, s. 24–25.]

Muuntajien kytkennät ilmoitetaan kirjain- ja numerosymboleilla. Isolla kirjaimella ilmoitetaan suuremman ja pienellä kirjaimella pienemmän jännitteen käämitys. Kirjain Y;y tarkoittaa käämityksen tähtikytkentää, kirjain D;d tarkoittaa käämityksen kolmiokytkentää ja kirjain Z;z tarkoittaa käämityksen hakatähtikytkentää. Jos tähti- tai hakatähtikäämityksen kirjaimen jälkeen on kirjain N;n, niin se tarkoittaa tähtipisteen tuontia liittimelle. Numerosymboleilla ilmaistaan muuntajien vaihesiirtoa ja apuna käytetään kello- tai tuntilukemia. Tunnusluku kuvastaa alajännitteen vaihesiirtoa, kun yläjännite on asetettu kello kahteentoista. Tällöin esimerkiksi YNd11 tarkoittaa, että alajännitteen vaihesiirto on 30 astetta edellä yläjännitettä (kuva 16). Jos muuntajan numerosymboli on 0, niin silloin ei vaihesiirtoa ole. Muuntajien kirjain- ja numerosymboleilla saadaan esitettyä kytkentä yksinkertaisesti. [9, s. 24–25.]



Kuva 16. Muuntajien käämikytkentä ja vaihesiirto, kytkentäryhmä on YNd11. [9, s. 25.]

Verkostolaskennassa muuntajilla on suuri merkitys oikosulkuvirtaa rajoittavana komponenttina, erityisesti teollisuuden verkoissa, joissa etäisyydet ovat lyhyitä.

Yleensä muuntajat kuvataan pelkkinä oikosulkuimpedansseina. Suurissa muuntajissa oikosulkuimpedanssi voidaan kuvata pelkästään reaktiivisena. Laskettaessa sysäys-oikosulkuvirtaa i_s ja muita tasakomponentin sisältäviä yhtälöitä tulisi resistanssi ottaa huomioon. [3, s.18.]

Tässä työssä käsittelem pelkästään kolmivaiheisia kaksikämmimuuntajia, joiden oikosukusuureet voidaan laskea kilpiarvojen perusteella seuraavasti: [9, s.28–29.]

$$Z_k = z_k * \frac{U_n^2}{S_n} \quad (17)$$

$$X_k = x_k * \frac{U_n^2}{S_n} \quad (18)$$

$$R_k = r_k * \frac{U_n^2}{S_n} \quad (19)$$

Z_k on muuntajan oikosulkuimpedanssi
 z_k on muuntajan oikosulkuimpedanssi prosentteina
 U_n on muuntajan nimellisjännite, pääjännite
 S_n on muuntajan nimellisnäennäisteho
 X_k on muuntajan oikosulkureaktanssi
 x_k on muuntajan suhteellinen oikosulkureaktanssi
 R_k on muuntajan oikosulkuresistanssi
 r_k on muuntajan suhteellinen oikosulkuresistanssi.

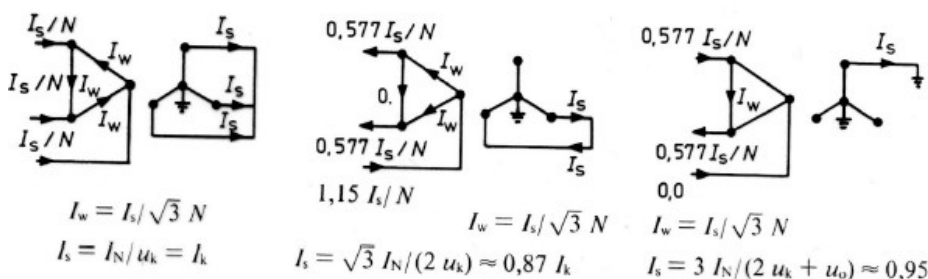
Arvokilvessä on yleensä ilmoitettu muuntajan oikosulkuimpedanssi prosentteina. Muuntajan suhteellinen oikosulkuresistanssi saadaan laskettua kuormitushäviöiden P_k ja näennäisnimellistehon S_n avulla seuraavasti:

$$r_k = \frac{P_k}{S_n} \quad (20)$$

Oikosulkureaktanssi on x_k laskettavissa yhtälöllä:

$$x_k = \sqrt{Z_k^2 - r_k^2} \quad (21)$$

Dyn-kytkentäisillä muuntajilla on hyvä huomioida vikavirtojen muuntuminen toisiosta ensiöön erilaisissa vikatapauksissa (kuva 17). Kolmivaiheisessa oikosulussa virta muuntuu suoraan muuntosuhteella kaikissa vaiheissa, kun taas yksi- ja kaksivaiheisissa vioissa vaikutus ensiöpuolella on epäsymmetrinen [2].



Kuva 17. Dyn-kytkentäisen muuntajan oikosulkuvirrat erilaisissa vikatapauksissa. [2.]

5.3.2 Fazer Vaaralan muuntajat

Fazer Vaaralan jakeluverkossa on yhteensä 27 kappaletta Dyn-kytkentäisiä 20/0,4 kV muuntosuhteen muuntajaa. Muuntajista suurimmat ovat 1600 kVA:n suuruisia; niitä on yhteensä 13 kappaletta. Pienin muuntaja on 800 kVA:n suuruinen, ja se palvelee paineilmalaitteistoa. Loput muuntajat ovat 1000 kVA:n suuruisia. Muuntajista 9 kappaletta on öljymuuntajia ja loput kuivamuuntajia. Uusien muuntajien kohdalla käytäntö on opetanut, että 1600 kVA:n kuivamuuntaja on sopivin vaihtoehto alueen käyttötarpeita ajatellen.

Muuntoasemat on nimetty tehtaiden mukaan niin, että FLMA on leipomoa ja MA on makeistehdasta. Jokainen muuntaja syöttää omaa pääkeskusta. Vanhin muuntaja FLMA T1 on valmistettu vuonna 1970 ja uusin MA10 T1 muuntaja vuonna 2016. Jakeluverkossa muuntoasemien huoltoväli on kaksi vuotta ja muuntajien uusintaväli on 25–30 vuotta.

5.4 Kojeistot

Keskijännitekojeistot ovat sf6-kaasueristeisiä Siemens 8DH10 -tyypin kojeistoja lukuun ottamatta kytkinasemia KA 1211 ja KA 1212, jotka ovat tyypiltään ABB Unigear -vaunukatkaisijakojeistoja. Nimellisjännite U_n on kojeistoissa 24 kV, terminen oikosulku-

virtakestoisuus I_{th} on välillä 10–20 kA ja dynaaminen oikosulkuvirtakestoisuus I_{dyn} on välillä 25–50 kA.

Pienjännitekojeistot eli pääkeskukset muuntajien jälkeen ovat ABB:n valmistamia. Osa muuntoasemista on varustettu kahdella muuntajalla ja kahdella pääkeskuksella, jotka on yhdistetty kiskosillalla toisiinsa. Tällä ratkaisulla voidaan molempia kojeistoja syöttää yhdellä muuntajalla, jolloin toinen muuntaja voidaan kytkeä irti verkosta esimerkiksi huoltoa varten. Pääkeskusten nimellisjännite U_n on 400 V, nimellisvirrat ovat välillä 1600 -2500 A, terminen oikosulkuvirtakestoisuus I_{th} on välillä 40 -50 kA ja dynaaminen oikosulkuvirtakestoisuus I_{dyn} on välillä 80 -105 kA.

Oikosulkuvirtojen laskennassa kojeistojen eri komponenttien impedanssit ovat yleensä niin pieniä, että niitä ei tarvitse ottaa huomioon.

5.5 Johdot, kaapelit ja kiskot

Teollisuuden keskijänniteverkoissa kaapeleiden pituudet ovat lyhyitä, jolloin niiden vaikutus oikosulkuvirtalaskelmissa on pieni. Kaapeleiden resistanssi- ja reaktanssien arvot saa valmistajalta tai Senerin verkostosuositus SA 5:94:sta, joka sisältää liitteen eri kaapelityyppien yleisarvoista.

Kaapelin impedanssin Z_j saa laskettua yhtälöllä:

$$Z_j = (r + jx)l \quad (22)$$

r on kaapelin tasavirtaresistanssi (+20 °C) pituusyksikköä kohti

jx on kaapelin reaktanssi pituusyksikköä kohti

l on kaapelin pituus.

Vaaralan sähköasemalta tulevat syöttökaapelit ovat tyypiltään APYAKMM 240 mm² ja AHXAMK-W 185 mm². Kaapelit on asennettu palonkestävästi. Fazerin oman verkon runkokaapelit ovat tyypiltään AHXAMK-W ja AHXAMK-W, poikkipinnan vaihdellessa välillä 120–185 mm². Kaapelit on asennettu maahan sekä hyllyille. Muuntajat on kytketty keskijännitekojeistoihin HXCMK 35mm²:n kaapeleilla ja pienjännitekojeistoihin kiskosilloilla.

Kiskostojen pituudet ovat yleensä niin lyhyitä, että niiden muodostama impedanssi ei vaikuta merkittävästi oikosulkuvirtalaskelmiin.

5.6 Epätahtimoottorit

Teollisuusverkkoon on yleensä kytketty suuria määriä epätahtimoottoreita, jotka tulisi ottaa huomioon laskettaessa sähkönjakeluverkon alkuoikosulku-, sysäysoikosulku- ja katkaisuvirtoja. Epätahtimoottorit toimivat oikosulkutilanteessa hetken aikaa generaattoreina ja näin ollen osallistuvat kasvattavasti alkuoikosulkuvirran suuruuteen. Taajuusmuuttajalla ohjattuja moottoreita ei tarvitse laskennassa ottaa huomioon, koska ohjainlaite kuluttaa generaattoritehon häviöinä moottorin käämityksissä. [1, s.228.]

Epätahtimoottorin oikosulkuimpedanssi Z_m voidaan laskea yhtälöllä:

$$Z_m = \frac{1}{\frac{I_s}{I_n}} * \frac{U_n^2}{S_n} \quad (23)$$

I_s on moottorin käynnistysvirta

I_n on moottorin nimellisvirta

U_n on moottorin nimellispääjännite

S_n on moottorin nimellinäennäisteho.

Pienjänniteverkon kaikkia epätahtimoottoreita ei kannata mallintaa laskelmiin, vaan niistä kannattaa muodostaa muuntajakohtaiset ekvivalenttiset moottorit. Ekvivalenttisen moottorin teho on koko moottoriryhmän summateho ja I_s on 5. Jos samaan aikaan pyörivien suorakäynnisteisten epätahtimoottoreiden nimellisteho on yli 25 prosenttia syöttävien muuntajien kokonaistehosta, tulee epätahtimoottoreiden verkkoon syöttämä oikosulkuvirta ottaa laskennassa huomioon. Tätä rajaa voidaan pitää laskennan suunnitteluohjeena. [1, s.228.]

Työtä tehtäessä ei ollut käytettävissä muuntajakohtaisia moottoriluetteloita, joten laskelmassa ei ole otettu huomioon epätahtimoottoreiden vaikutuksia oikosulkuvirtoihin. Tiedossa kuitenkin oli, että kuormituksesta osa on resistiivistä ja huomattavaa osaa moottoreista ohjataan taajuusmuuttajilla.

6 Verkon mallinnus ja oikosulkuvirtalaskenta

6.1 Neplan

NEPLAN AG on perustettu vuonna 1988 ja yrityksen pääkonttori sijaitsee Küsnachtissa Sveitsissä. Yritys on yksityisomisteinen ja täysin itsenäinen ohjelmistotalo. Neplan AG on osa kansainvälistä Neplan-Consulting groupia.

Neplan on moduulipohjainen ohjelmisto sähkö-, vesi-, kaasu- ja lämmitysverkoille, ja sitä on myyty yli 110 maahan. Ohjelman voi hankkia valmiina pakettina ja siihen voi ostaa lisää moduuleja yrityksen tarpeen mukaan. Ohjelmiston laajuudesta riippuen, Neplanilla voi suunnitella, analysoida, optimoida ja simuloida eri järjestelmiä.

Neplanilta löytyy moduulit sähköjakelu-, teollisuus- ja tuotantoverkoille mukaan lukien uusiutuvat energijärjestelmät ja Smart Grid –sovellus. Käytössäni oli industrial-paketti, joka sisälsi 50 laskentasolmua. Pakettiin kuului tehonjako-, oikosulkuvirta- ja moottorienkäynnistyslaskentamoduuli, sekä selektiivisyysanalyysi-, kaapeleidenmitoitus- ja suojausasettelumoduuli. Ohjelman mukana tulee käyttöohjeita ja opetusvideoita. Neplan sisältää myös kirjastot kaapeleille ja suojauslaitteille.

6.2 Laskenta

Neplan-ohjelmassa verkko mallinnetaan kaavionäkymään. Mallipohjana oli nykyinen 20 kV-jakeluverkoston pääkaavio, jotta kuvat olisivat helposti vertailtavissa. Rakenne noudattaa tehdasalueella olevien kytkin- ja muuntoasemien maantieteellistä sijoittelua.

Syöttävän verkon oikosulkuvirta- ja impedanssiarvot Fazer Vaaralan tapauksessa sai pyydettyä Vantaan Energia Sähköverkot Oy:ltä. Neplaniin syötettävät parametrit on esitelty liitteessä 1. Verkkoa syöttävä oikosulkuvirta tai oikosulkuteho riittää, jos tulokseksi riittää likiarvo. Tarkkoja arvoja laskettaessa tulee syöttävästä verkosta antaa R/X -suhde, sekä yksivaiheisia vikoja laskettaessa nollaimpedanssit.

Vantaan Energialla on useita erilaisia verkon käyttötilanteita, jotka vaikuttavat Fazerille syötettävän oikosulkuvirran suuruuteen. Syöttävän verkon arvot voi muuttaa jokaisessa

laskentatilanteessa uudelleen yhteen verkkoon tai toinen vaihtoehto on tehdä useita verkkoja, joita voi ohjata logiikkakytkimillä. Neplanissa jokainen komponentti sisältää päälle/pois-kytkimen, jota voi ohjata tarpeen mukaan.

Neplaniin voi lisätä kaapelikirjaston, josta saa lisättyä kaapeleiden tekniset tiedot niitä suunniteltaessa kaavioon. Kaapelikirjasto (liite 2) ei vastaa nimikkeistöltään Suomessa käytettyjä kaapeleita. Ohjelmaan pystyy tekemään myös omia komponenttikirjastoja. Fazer Vaaralan jakeluverkkoon asennetut kaapelit ja niiden pituudet olivat dokumentoitu kaavioihin, joten selvitystyötä paikanpäällä ei tältä osin tarvinnut tehdä.

Muuntajan parametrien syöttöruutu on esitetty liitteessä 3. Likimääräisen kolmivaiheisen oikosulkuvirran laskentaan riittää muuntajan nimellisteho, muuntosuhde ja oikosulkuimpedanssi prosentteina. Tarkempia arvoja laskettaessa, muuntajista on annettava myös häviöteho- ja nollaimpedanssiarvot.

Muuntajien arvokilvet sisältävät yleensä tarvittavat tiedot laskentaa varten. Jos tietoja arvokilvessä ei ole, voi käyttää myös valmistajan taulukkoarvoja. Muuntajien todelliset arvot saattavat kuitenkin poiketa taulukkoarvoista.

Taulukko 3. Öljytäytteisten jakelumuuntajien tekniset arvot ABB. [9, s. 28.]

Teho kVA	Muuntosuhde V/V	Kyt- kentä	P_0 W	P_k W	Z_k %	Z_0 %	I_0 %	Kok.paino kg	Öljyä kg
315	20500±2x2,5%/410	Dyn11	600	4500	4,5	4,6	0,8	1220	270
500	20500±2x2,5%/410	Dyn11	720	6600	5,0	5,2	0,7	1650	340
630	20500±2x2,5%/410	Dyn11	890	7200	5,0	5,2	0,7	1800	380
800	20500±2x2,5%/410	Dyn11	1200	8500	5,5	5,7	0,5	2240	450
1000	20500±2x2,5%/410	Dyn11	1450	10200	5,5	5,7	0,5	2640	520
1250	20500±2x2,5%/410	Dyn11	1600	11500	5,5	5,7	0,4	2955	580
1600	20500±2x2,5%/410	Dyn11	1840	14100	5,5	5,7	0,4	3680	760
2000	20500±2x2,5%/410	Dyn11	2130	16000	6,0	6,4	0,3	4200	860
2500	20500±2x2,5%/690	Dyn11	2550	18000	6,0	6,4	0,3	5150	1040

Oikosulkuvikatyypin valinta ja laskenta on esitelty liitteessä 4. Ohjelmassa voidaan valita käytettävä laskentastandardi ja vikatyyppi. C-kerroin voidaan määritellä itse tai antaa ohjelman valita se standardin mukaiseksi. Laskettavien solmujen määrä on itse valittavissa. Vika voidaan tehdä myös esimerkiksi johonkin kohtaan kaapelia. Kaavionäkymään voidaan määritellä siellä näkyvät arvot. Valintaruutu on esitelty liitteessä 7.

6.3 Tulokset

Tuloksena saatiin Neplaniin mallinnettu Fazer Vaaralan sähköjakeluverkko ja sen oikosulkuvirrat. Verkosta tehtiin kolme perustilannetta omiin kaavionäkymiin, jotka ovat mainittuna alaluvussa 5.2. Kaavioista tehtiin A0-kokoiset, ja ne voi tulostaa paperiversioiksi niin halutessaan. Tulostusvaiheeseen on vain valittava arvot, jotka siinä halutaan näkyvän.

Syöttävän verkon maksimitilanteessa suurin kolmivaiheinen oikosulkuvirta Fazer Vaaralan 20 kV jakeluverkossa on välillä 14,8–12,3 kA. Pienjännitepuolella suurin kolmivaiheinen oikosulkuvirta 39,6 kA syöttävän verkon maksimitilanteessa on muuntamolla MA10. Suurin sysäysoikosulkuvirta 93,3 kA tässä verkon tilanteessa on myös muuntamolla MA10.

Syöttävän verkon normaalitilanteessa suurin kolmivaiheinen oikosulkuvirta Fazer Vaaralan 20 kV jakeluverkossa on välillä 8,2–7,4 kA. Tässä syöttävän verkon tilanteessa suurin kolmivaiheinen oikosulkuvirta 38 kA pienjännitepuolella on muuntoasemalla MA10.

Syöttävän verkon minimitalanteessa 20 kV jakeluverkon suurin kolmivaiheinen oikosulkuvirta on välillä 4,7–4,3 kA. Suurin kolmivaiheinen oikosulkuvirta 35,9 kA pienjännitepuolella on muuntamolla MA5.

6.4 Tuloksien tarkastelu

Oikosulkuvirrat ovat hieman muuttuneet edellisestä laskelmasta. Syöttävän verkon oikosulkuvirtojen muutokset, varayhteyden muuttuminen toiselle VES:n muuntoasemalla ja laskettavan verkon tarkemmat tekniset tiedot olivat eroavaisuuksien päätekijät.

Oikosulkuvirran suuruuteen Fazer Vaaralan jakeluverkossa vaikuttaa eniten jakelu-muuntajat ja niiden impedanssit. Kaapelipituudet 20 kV jakeluverkossa ovat niin lyhyitä, että niiden merkitys oikosulkuvirtalaskelmiin on pieni. Pienjännitepuolella kaapeleiden impedanssit alkavat vaikuttaa jo huomattavasti enemmän.

Honkanummen sähköaseman varayhteyden ollessa käytössä muuttuu pienjännitepuolen suurimman oikosulkuvirran sijaintipiste. Tähän on syynä VES:n liityntäpisteen vaihtuminen kytkinasemilta KA 1211 ja KA 1212 muuntoasemalle FLMA 3. Kytkeä muuttuu myös hieman Fazerin jakeluverkoissa, jolloin kaapelipituudet vaikuttavat suurimman oikosulkuvirran sijaintipisteeseen. Ero muuntoasemien FLMA 5 ja MA 10 oikosulkuvirroissa on kuitenkin hyvin pieni syöttävän verkon minimitalanteessa.

7 Yhteenveto

Työssä tutustuttiin teollisuuden sähköjakeluverkossa syntyviin oikosulkuvirtoihin eri vikatilanteissa ja niiden laskentaan. Jakeluverkon mallinnus ja laskenta toteutettiin moduulipohjaisella Neplan-verkostolaskentaohjelmalla. Käytössäni oli industrial-paketti, joka sisälsi 50 laskentasolmua. Ohjelmaan voi halutessaan ostaa lisää laskentamoduuleja ja solmupisteitä.

Tietokoneohjelmat helpottavat sähköverkostolaskentaa huomattavasti, mutta ilman riittävää teoriapohjaa tulosten oikeellisuuden analysoiminen on vaikeaa. Laskentaohjelmaan on helppoa lisätä vääriä arvoja verkon eri komponenteista, jolloin tulokset saattavat muuttua merkittävästi. Ominaisoikosulkutehomenetelmä on helppo tapa tarkastaa likimääräisesti tulosten oikeellisuus, jos epäilee syöttäneensä ohjelmaan vääriä arvoja.

Neplan-ohjelmaan sähköjakeluverkko tehdään kaavionäkymään, joka on hyvin selkeä. Tässä työssä pohjana käytettiin olemassa olevaa Magicad-ohjelmalla tehtyä kaavionäkymää, jotta kuvien vertaaminen keskenään olisi helppoa. Rakenne noudattaa tehdasalueella olevien kytkin- ja muuntoasemien maantieteellistä sijoittelua. Alussa ohjelman käyttöön saattaa liittyä hankaluuksia. Komponenttien valinta, niiden yhdistäminen toisiinsa, komponenttien määrittely tarvittavine arvoineen ja tulosten laskenta saattaa olla alussa haasteellista ilman opastusta. Neplaniin ei ole saatavilla koulutusta Suomessa eikä minulla ollut aiempaa kokemusta ohjelman käytöstä.

Fazer Vaaralan sähköjakeluverkon oikosulkuvirtalaskelmat on tehty viimeksi vuonna 2008 VESin toimesta. Oikosulkuvirrat Vantaan Energian jakeluverkossa ovat hieman muuttuneet edellisestä laskennasta, joten päivitys oli tarpeellinen. Varayhteys Hakkilasta oli vaihtunut Honkanummen sähköasemalle ja Fazer Vaaralan sähköjakeluverk-

koon on tullut lisää muuntoasemia edelliseen koko verkon kattavaan laskentaan verrattuna.

Oikosulkuvirrat ovat suuria, niin kuin teollisuusverkon luonteeseen kuuluu. VES:n syöttämä oikosulkuvirta on normaalin suuruinen pois lukien maksimitilanne, jolloin oikosulkuvirta on keskimääräistä suurempi. Kaapelipituudet Fazer Vaaralan muuntoasemien ja kytkinasemien välillä ovat vain satoja metrejä, kun 20 kV:n jakeluverkossa voidaan maksimissaan siirtää muutamia megawatteja jopa 30 kilometriä.

Muuntajien valinnalla on suurin merkitys oikosulkuvirran suuruuteen. Muuntajien impedansseilla saadaan erityisesti sysäysoikosulkuvirtaa rajoitettua niin, että pienjännitekojeistoilta ei vaadita yli 105 kA:n dynaamista oikosulkukestoisuutta. Oikosulkuvirtaa voidaan rajoittaa pienjännitepuolella esimerkiksi kahvasulakkeilla. Dynaaminen oikosulkestoisuus tulee huomioida erityisesti jakelumuuntajan ja pienjännitepääkeskuksen välillä. VES oli suositellut jo aiemmin, että verkkoon ei suunniteltaisi yli 1600 kA:n muuntajia. Näissäkin muuntajissa olisi huomioitava, että oikosulkuimpedanssi prosentteina olisi vähintään 6 %. Muuntamon MA10-muuntaja on valittu näiden suositusarvojen mukaan. Kyseisellä muuntamolla onkin pääsääntöisesti suurimmat dynaamiset oikosulkuvirta-arvot, jotka pysyvät kuitenkin alle 105 kA:n.

Insinööriyön ansiosta Fazer Vaaralan oikosulkuvirtalaskelmien päivittäminen on tulevaisuudessa helpompaa. Alueelle tulee uusia muuntajia ja muuntoasemia säännöllisin väliajoin, joiden lisääminen laskelmaan on helppoa. Vanhimpien muuntajien tullessa käyttöikänsä päähän ohjelmalla voidaan optimoida sopivan kokoinen uusi muuntaja vanhan tilalle.

Tulevaisuudessa Neplanilla voidaan tutkia vaikka Fazer Vaaralan jakeluverkon nykyistä suojausta ja sen selektiivisyyttä tarkemmin. Tähän voi liittyä esimerkiksi maasulkuvirtojen ja muuntajien kytkentävirtasysäysten laskenta, joka on tehty viimeksi vuonna 2008 VES:n toimesta. Ohjelmaan voidaan syöttää muuntamokohtaiset huipputehot, jolloin 20 kV jakeluverkosta saadaan selville kuormituksen jakautuminen verkon eri osissa. Selvityksen perusteella voidaan miettiä mahdollisia kytkentämuutoksia, jos kuormitusta on tasattava jakeluverkossa.

Lähteet

- 1 Hietalahti, L. 2013. Teollisuuden sähkökäytöt. Tampere: Tammertekniikka.
- 2 Kupari, S. 2015. Luentomateriaali teollisuuden sähköverkot. Helsinki. Metropolia.
- 3 Lakervi, E., Partanen, J. 2008. Sähkönjakelutekniikka. Helsinki: Otatieto.
- 4 Huotari, K., Partanen, J. 1998. Teollisuuden oikosulkuvirtojen laskeminen. Opetusmoniste 3. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu.
- 5 Elovaara, J., Haarla, L. 2010. Sähköverkot 1. Helsinki: Otatieto.
- 6 ABB:n TTT-käsikirja 2000-07, luku 7
- 7 Fazer vuosikatsaus 2015. Verkkodokumentti. <http://www.fazergroup.com/fi/tietoameista/vuosikertomus-2015/>.
- 8 Korteesvuo, Mika. 2016. Käytönjohtaja, Fazer Vaarala, Vantaa. Haastattelu 9.9.2016.
- 9 Hietalahti, L. 2011. Muuntajat ja sähkökoneet. Tampere: Tammertekniikka.

Liite 1. Neplan, syöttävän verkon parametrit

Network Feeder

Parameters

Quick Edit
Reliability
Harmonic Analysis
Other Analysis
Info
More...
User Data

Parameters

Name: F-1792
Type: ...

Three Phase SC Quantities

Sk"max .. MVA: 0 Sk"min .. MVA: 0 ☒ Ik" according to IEC
Ik"max .. kA: 0 0 * Ik"min .. kA: 0 0 * Eoper .. pu: 1
R(1)/X(1) max: 0 R(1)/X(1) min: 0

Single Phase SC Quantities

Ik"max .. kA: 0 0 * Ik"min .. kA: 0 0 *
Z(0)/Z(1) max: 0 Z(0)/Z(1) min: 0
R(0)/X(0) max: 0 R(0)/X(0) min: 0

Operational data

LF-Type: SL Slack portion .. %: 0
P oper .. MW: 0 U oper .. %: 100
Q oper .. Mvar: 0 Uw oper .. %: 0
Remote controlled bus: ...

Operating mode

Harmonic Analysis

C .. uF: 0

Generation cost MW

c0 .. CurrU/MW²/h: 0
c1 .. CurrU/MW/h: 0
c2 .. CurrU/h: 0
Mult. factor: 1

Copy Paste Library Export OK Cancel Color Help

Liite 2. Neplan, kaapelit

Line

Parameters

Name: 12/3X185Al+35Cu

Type: 3x185Al+35Cu

Length .. km: 0,35 Units: Ohm/km

Number of lines: 1 EMT model: PI

R(1) .. Ohm/km: 0,169 R(0) .. Ohm/km: 0,524

X(1) .. Ohm/km: 0,119 X(0) .. Ohm/km: 0

C(1) .. uF/km: 0,26 C(0) .. uF/km: 0

B(1) .. uS/km: 81,681 B(0) .. uS/km: 0

G(1) .. uS/km: 0

Ir max (low) .. A: 0

Ir max (med) .. A: 0

Ir max (high) .. A: 330

Reduction factor: 1

IEr max .. A: 185

☐ Asymmetric Pi with sections

☒ Switchable

Copy Paste Library Export OK Cancel Color Help

Liite 3. Neplan, muuntajat

2W Transformer

Parameters

Name: TR2-1799

Type: ☒ 3-phase transformer ☐ 3 x 1-phase transformer

Un1 .. kV: 0 Un2 .. kV: 0 Sr .. MVA: 0

Ur1 .. kV: 0 Ur2 .. kV: 0

URr(1) .. %: 0 kW: 0 URr(0) .. %: 0 kW: 0

Ukr(1) .. %: 0 Ukr(0) .. %: 0

X(1)/R(1): 0 X(0)/R(0): 0

IO .. %: 0 U01(0) .. %: 0 LMUNS .. pu: 0

P fe .. kW: 0 U02(0) .. %: 0 LMSAT .. pu: 0

KP .. pu: 0

phiresA .. pu: 0

phiresB .. pu: 0

phiresC .. pu: 0

☐ has on-load tapchanger capabilities (IEC 60909)

☐ On-load tapchanger active

☐ Switchable

☐ Autotransformer

Vector Group: Yy0

Copy Paste Library Export OK Cancel Color Help

Liite 4. Oikosulkuvirtojen laskenta

Short Circuit Parameters

Parameter Faulted nodes Faulted lines Special fault Arc Flash Calculation

Fault type: 3phase fault

Calculation method: IEC60909 2001

Ik" max calculation ☒ Load flow before Short circuit calculation ☒

Fault distance (number of nodes) for display of results: 0 Asymmetrical network ☐

Calculation according to IEC60909

☒ Automatic selection of c factor 1,1 Fault duration in s for thermal current calculation: 1

☐ Reduced tolerance in low-voltage system (only +6%) Fault duration in s for DC current idc calculation: 0,02

☒ R/X at fault location for ip branch calculation Time delay of CB in s for breaking current calc. Ib: 0,02

Calculation according to IEC61363-1 or IEC 61660-1(DC)

Currents at time .. s: 0 Preload conditions: Nominal values

Time delay of CB in s for breaking current calc. Ib: 0 ☐ Time Behaviour T end .. s: 0

Calculation according to ANSI

Number of Cycles for DC current IDC calculation: 2

Number cycles for breaking current calculation Ib: 2

E operating .. pu: 1

☐ Display Fault location in Message Window

Arc Impedance (not according to IEC/ANSI)

Resistive part .. Ohm: 0

Reactive part .. Ohm: 0

References

IEC/ANSI: Voltage as Superposition Method ☐

Current reference: ☒ U equivalent ☐ U Node

Resonance earthed and isolated networks

☐ Simplified zero sequence impedance calculation Un of resonance earthed or isolated network..kV 0

Result File

...

☐ Write after calculation ☐ Format 4 x

Breaking Conditions

☒ IEC/VDE Standard ☐ Swiss Standard

Maximal loading of elements

Loading .. %: 100

OK Peruuta Käytä Ohje

Liite 5. Neplan, näytettävät arvot

Valintaruudukko, jolla määritellään kaaviossa näytettävät arvot

Diagram Properties

General Data	Colors	Color Ranges	Labels	Load Flow
Short Circuit	Harmonic Analysis	Reliability/RCM	Width	Fonts

Node variables

<input type="checkbox"/> UF L-E	<input type="checkbox"/> U(012)	<input type="checkbox"/> U0	<input type="checkbox"/> Z(.) / Z(1)	<input type="checkbox"/> Rf, Xf (012)
<input type="checkbox"/> UF L-L	<input type="checkbox"/> UF angle	<input type="checkbox"/> Zf(012)	<input type="checkbox"/> R(.) / X(.)	<input type="checkbox"/> Fault Distance
<input checked="" type="checkbox"/> Only Node Results (No Branch Results)				

Element variables

<input checked="" type="checkbox"/> Ik"	<input type="checkbox"/> Ib	<input type="checkbox"/> E/Z	<input type="checkbox"/> Z_L	<input type="checkbox"/> Z0_L
<input type="checkbox"/> Ik" angle	<input type="checkbox"/> Ik	<input type="checkbox"/> 3 I(0)	<input type="checkbox"/> R_L	<input type="checkbox"/> R0_L
<input type="checkbox"/> Sk"	<input checked="" type="checkbox"/> Ith	<input type="checkbox"/> Z Relay	<input type="checkbox"/> X_L	<input type="checkbox"/> X0_L
<input checked="" type="checkbox"/> ip	<input type="checkbox"/> idc	<input type="checkbox"/> Tripping	<input type="checkbox"/> iDCp	
<input type="checkbox"/> I/∅ tot	<input type="checkbox"/> Iasy	<input type="checkbox"/> Trip Time in Cycles		

Phases, sequences

<input checked="" type="checkbox"/> L1	<input checked="" type="checkbox"/> Pos.
<input type="checkbox"/> L2	<input type="checkbox"/> Neg.
<input type="checkbox"/> L3	<input type="checkbox"/> Zero

ArcFlash

☐ Results

Display options

Unit	Digits	Digits
Current: <input type="text" value="kA"/>	<input type="text" value="3"/>	Voltage: <input type="text" value="3"/>
Power: <input type="text" value="MVA"/>	<input type="text" value="3"/>	Impedance: <input type="text" value="5"/>
<input checked="" type="checkbox"/> Show variable names		<input checked="" type="checkbox"/> Show units
<input checked="" type="checkbox"/> Color Fault Location		<input type="text" value="Yellow"/>
<input type="checkbox"/> Color Fault Loc. Label		

☒ Show labels

☒ Show results:

<input checked="" type="checkbox"/> Load flow	<input type="checkbox"/> Harmonic analysis	<input type="checkbox"/> Fault finding
<input checked="" type="checkbox"/> Short circuit	<input type="checkbox"/> Reliability/RCM	<input checked="" type="checkbox"/> LV Calculation

OK Peruuta Käytä Ohje